

La réflectométrie temporelle une nouvelle approche des mesures d'humidité

La réflectométrie temporelle est une méthode récente de mesure de l'humidité volumique du sol. Les atouts du matériel et ses applications à l'irrigation, présentés dans cet article, démontrent la performance de cette technique et son intérêt pour effectuer des diagnostics en hydrodynamique des sols, notamment en milieu tropical.

P. TODOROFF, P. LANGELLIER
CIRAD-CA, Igoe Paradis,
97410 Saint-Pierre, Réunion, France
Adresse future de P. TODOROFF
ISRA, BP 199, Kaolak, Sénégal

La connaissance de la teneur en eau du sol est essentielle pour contrôler l'irrigation. Les mesures d'humidité du sol s'effectuent soit par des méthodes destructrices (prélèvement d'échantillons), soit par des méthodes *in situ*. Il n'existe pas de technique d'évaluation de l'humidité du sol à la fois facile à mettre en œuvre et totalement sûre. La méthode par prélèvements de cylindres de sol est longue et lourde en main-d'œuvre ; elle nécessite un nombre élevé de répétitions de mesures — une dizaine. Cependant, c'est une des plus fiables pour traiter des mesures en valeur absolue. La sonde à neutrons nécessite un étalonnage coûteux ; elle présente de nombreuses contraintes dues aux risques de contamination radioactive, elle a une grande sensibilité à des facteurs autres que l'eau (la densité apparente) et n'est pas utilisable pour des relevés dans l'horizon superficiel. De nouvelles méthodes sont recherchées : rapides, faciles à utiliser sur le terrain, reproductibles, sûres...

La réflectométrie temporelle s'inscrit dans cette démarche. Cet article présente les principales caractéristiques de l'utilisation de cette technique d'après deux exemples expérimentaux, dont l'intérêt est essentiellement méthodologique.

Les récents développements de la réflectométrie

Depuis quelques années, une nouvelle méthode d'évaluation de l'humidité volumique du sol s'est développée en agronomie :

la réflectométrie temporelle (TDR, Time Domain Reflectometry). Son principe consiste à mesurer la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau et d'en déduire sa constante diélectrique relative. Ce paramètre représente une caractéristique du matériau, fortement liée à sa teneur en eau. L'eau étant fortement dipolaire, sa constante diélectrique relative est très différente de celle d'un sol sec : celle de l'air vaut 1 ; celle d'un sol sec, entre 3 et 5, et celle de l'eau, 81. La réponse du milieu à une excitation électromagnétique dépend donc essentiellement de sa teneur en eau.

La réflectométrie était utilisée depuis longtemps dans les télécommunications pour vérifier l'état des câbles électriques sous-marins à partir de la surface. C'est dans les

années 70 qu'ont eu lieu les premières tentatives d'application en agronomie. Les ondes émises se situant dans le domaine des hyperfréquences (gigahertz), les premières recherches ont caractérisé les propriétés des sols à ces fréquences (HOEKSTRA et DELANEY, 1974). Elles ont mis en relation la vitesse de propagation des ondes et la constante diélectrique du sol avec l'humidité volumique (DAVIS et ANNAN, 1977).

Dans les années 80, de nombreuses études ont permis d'améliorer le matériel et de préciser les étalonnages (TOPP *et al.*, 1980 ; ROTH *et al.*, 1982 ; KACHANOVSKY *et al.*, 1992). Les réflectomètres sont aujourd'hui d'utilisation relativement simple et ils offrent une mesure rapide qui peut être automatisée.

L'intérêt du réflectomètre, ses conditions d'emploi

Le maniement relativement simple de l'appareil est un avantage indéniable. Néanmoins, son utilisation suppose un étalonnage adéquat en fonction du type de sol.

Simplicité et disposition multiple de l'appareil

Un réflectomètre est constitué d'une unité centrale qui génère les impulsions (ondes électromagnétiques) ; il analyse le signal (ondes réfléchies) et enregistre les valeurs ; sur cette unité centrale sont branchées des sondes (figure 1). Elles sont constituées de deux ou trois tiges en acier inoxydable (5 à 8 millimètres de diamètre) et de longueur variable (15 à 70 centimètres), scellées à une extrémité dans un bloc d'époxyde qui les maintient parallèles et écartées de 5 centimètres.

Elles sont installées verticalement ou horizontalement dans le sol. Cette dernière disposition permet d'effectuer des relevés selon un maillage relativement serré (figure 2), compensant ainsi le faible volume de sol exploré par une sonde (limité à un rayon de 3 centimètres autour des tiges). Avec cette disposition, les mesures superficielles sont effectuées avec une bonne précision. Les sondes peuvent rester en place, en surface ou en profondeur et éventuellement être enterrées comme dans l'exemple du suivi d'irrigation d'un verger.

Le cas des andosols : estimation de leur humidité

Un appareil a été testé sur les sols tropicaux de la Réunion dans diverses situations. Les andosols sont les sols les plus représentés sur l'île de la Réunion entre 600 et 1 200 mètres d'altitude. Le caractère andique (teneurs très élevées en argiles ; présence de minéraux hydrophiles, les allophanes) confère à ces sols un comportement hydrique particulier : leur humidité volumique peut dépasser 100 %, voire 200 %, leur densité apparente est faible, inférieure à 0,9 gramme par centimètre cube. Ces particularités entraînent des difficultés météorologiques importantes avec les techniques classiques d'évaluation de l'humidité du sol, telles que les sondes capacitatives ou à neutrons. Il semblerait que l'eau absorbée dans ces sols soit associée à une porosité de faible dimension, la tension de l'eau du sol augmente donc très rapidement pour de faibles pertes d'humidité. Ainsi, malgré un sol ayant une forte capacité de rétention en eau, la disponibilité pour la plante est restreinte. Il est donc important d'obtenir des références de réflectométrie temporelle dans ce type de sol (TODOROFF, 1993).



Figure 1. L'appareil de mesure.

Cliché P. Todoroff

La valeur d'humidité fournie par l'appareil est une moyenne des humidités rencontrées le long de la sonde. Au-delà de 30 centimètres, la précision obtenue avec des sondes verticales devient peu acceptable (CORRE, 1991). L'humidité d'une tranche de sol peut être

déterminée avec des aiguilles verticales en implantant les aiguilles aux deux profondeurs qui délimitent cet horizon. Pour obtenir des résultats précis par profondeur, il est recommandé de disposer les sondes horizontalement après avoir creusé une fosse.

Comment effectuer les relevés

Il suffit d'enfoncer une sonde dans le sol, en assurant un très bon contact entre la sonde et la terre, à la main lorsqu'il n'est pas trop compact, de la connecter au réflectomètre et de déclencher le processus de mesure. La sonde choisie est connectée manuellement à l'appareil. Le résultat est obtenu en 10 à 15 secondes. Lorsqu'il est nécessaire d'utiliser de nombreuses sondes, elles sont connectées à un multiplexeur. Les valeurs sont mémoriables et programmables, ce qui permet des relevés fréquents, par exemple toutes les heures. Cette procédure n'est pas envisageable avec une sonde à neutrons, limitée à un seul capteur.

Le principe de la mesure et l'étalonnage

Les sondes positionnées dans le sol jouent le rôle de guides d'ondes. Les impulsions se propagent le long des aiguilles jusqu'à leurs extrémités où elles sont réfléchies. L'appareil calcule alors le temps mis par les ondes pour effectuer un aller-retour le long des guides et en déduit la vitesse de propagation, liée à la constante diélectrique du milieu par la relation suivante :

$$K_a = (c/v)^2$$

K_a : constante diélectrique relative ou permittivité apparente,

c : vitesse de la lumière = 3×10^8 mètres par seconde,

v : vitesse de propagation des ondes en mètre par seconde.

La relation entre l'humidité volumique d'une tranche de sol et sa constante diélectrique est fournie par un étalonnage empirique unique utilisable dans la plupart des sols (TOPP et al., 1980). L'étalonnage vise à établir une relation entre le temps de parcours de l'onde électromagnétique le long de la sonde et les paramètres du sol tels que l'humidité volumique (figure 3) et le poids spécifique apparent du sol sec.

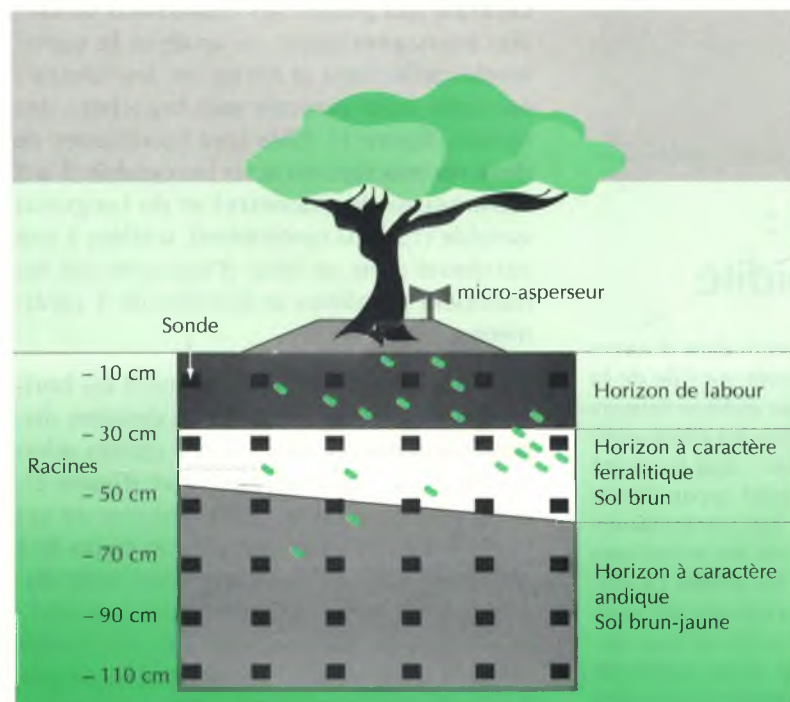


Figure 2. Schéma de la fosse de mesures dans l'exemple de l'étude de l'irrigation du verger de litchis.

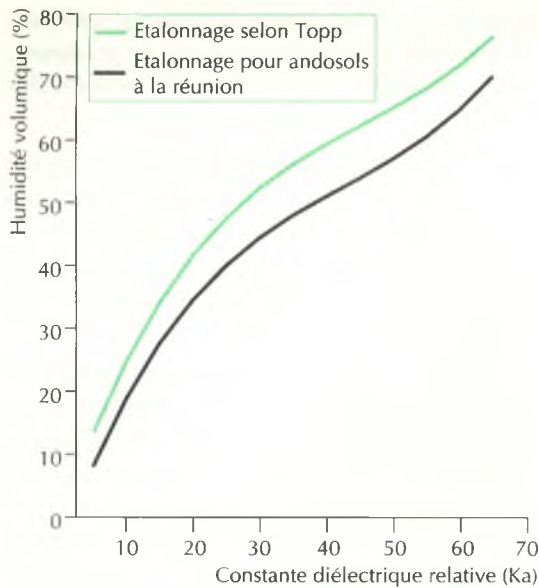


Figure 3. Courbes étalon pour l'interprétation des mesures de réflectométrie temporelle. Etalonnage spécifique pour les andosols.

Ce modèle empirique a été défini par rapport à certains sols (voir encadré). Ces sols ont une texture ne présentant pas de caractère diélectrique particulier comme une forte rétention d'eau liée dans les argiles à feuillets, la présence de minéraux renfermant des oxydes métalliques ou un taux de matière organique très élevé. Pour les sols se situant en-dehors de ce domaine (cas des sols à caractère andique rencontrés sur l'île de la Réunion), il est préférable de déterminer un étalonnage spécifique.

Des mesures précises pour optimiser l'irrigation

Pour des sols en phase d'humidification, l'utilisation de la méthode de réflectométrie temporelle aide à déterminer les doses optimales d'irrigation. A titre d'exemples, à la Réunion (dans la partie occidentale sous le vent, les précipitations sont inférieures à 1 000 millimètres par an) deux situations ont été analysées : pour un verger de jeunes litchis (3 ans) sous micro-asperersion et une culture maraîchère (tomate) irriguée au goutte à goutte. Effectuées en plusieurs emplacements, les valeurs des relevés sont mémorisées dans le réflectomètre et transférées sur micro-ordinateur. Le traitement des données par des méthodes géostatistiques aboutit à

une cartographie des teneurs en eau à un instant donné. En comparant deux cartes obtenues à des dates différentes, on obtient un bilan des apports ou des consommations d'eau au cours de cette période (figures 4, 5). Il est ainsi possible d'ajuster le conseil en irrigation (fréquence, dose, quadrillage...).

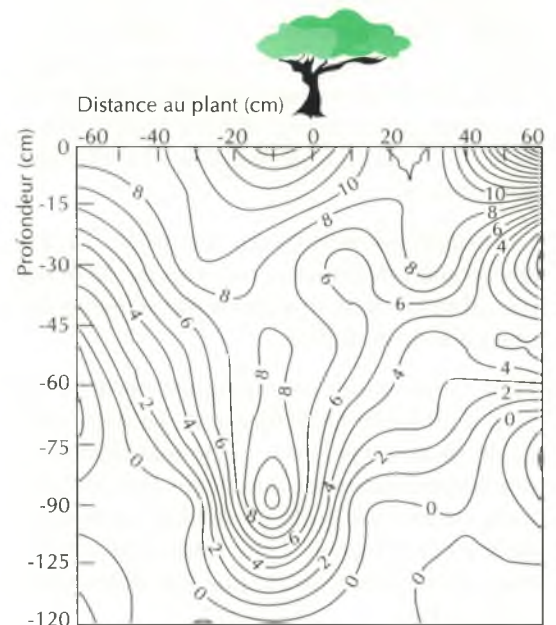


Figure 4. Bilan de l'infiltration après une heure d'irrigation sur litchis. Profil des écarts d'humidité mesurée par réflectométrie temporelle (en % d'humidité volumique).

Le zéro de l'axe des abscisses correspond à l'emplacement du microasperseur et de l'arbre. Les valeurs indiquées sur les courbes correspondent à la variation positive ou négative de l'humidité volumique entre les deux dates de mesures.

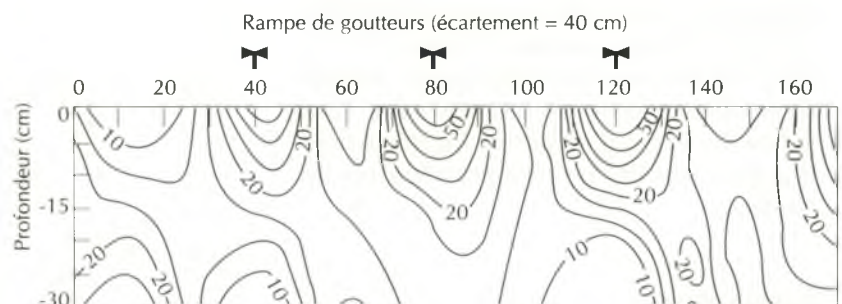


Figure 5. Bilan de l'infiltration après une demi-heure d'irrigation sur une culture de tomates. Profil des écarts d'humidité mesurée par réflectométrie temporelle. Des fortes valeurs apparaissent sous les goutteurs, près de la surface. En effet, le sol, au voisinage immédiat du goutteur, est rapidement saturé, justifiant le gain important d'humidité constaté. De plus, les valeurs affichées entre -5 centimètres environ et la surface proviennent d'extrapolations du logiciel (le point de mesure le plus proche étant centré à -7,5 centimètres sous la surface). Elles doivent donc être considérées comme des approximations.

L'irrigation d'un verger

Dans cette région du sud de l'île de la Réunion, les précipitations sont faibles, les ressources en eau sont limitées, des cultures de diversification sont expérimentées. On cherche à optimiser l'efficacité des apports d'eau sur un verger de litchis — culture pérenne au système racinaire important — et à éviter les drainages profonds en dessous de la zone d'enracinement. Pour établir ce diagnostic, il est intéressant de mettre en place un dispositif de mesure en temps réel avec une fréquence et une densité de relevés fortes ; cet essai a permis de tester le multiplexage des mesures.

L'irrigation est réalisée par micro-jets, disposés au pied des arbres, à raison de 43 litres par arbre en deux irrigations par semaine sur une période de 6 mois.

Pour cette étude, une fosse est creusée au pied d'un jeune litchi (figure 2). La paroi verticale située sous l'arbre a été quadrillée par des sondes enterrées, enfoncées horizontalement, selon une grille de mailles carrées de 20 x 20 centimètres. Cette fosse a été rebouchée, ne laissant ressortir que les câbles reliés aux sondes.

Des bilans ont été calculés à partir de mesures effectuées avant et après irrigation. Une zone d'humidification préférentielle a été mise en évidence (figure 4). Le front d'infiltration de cette zone atteint une profondeur de 1,2 mètre assez rapidement (1 heure 30 après le début de l'irrigation). Une grande partie du volume d'eau apporté est donc perdue par drainage car la profondeur d'enracinement ne dépasse pas 70 centimètres. Cette observation montre que le régime d'irrigation prévu ne tient pas compte de l'état initial du sol avant chaque irrigation, et qu'il convient de modifier les doses ou les fréquences. Pour pallier cet excès d'irrigation, les fréquences d'apport ont été finalement réduites de moitié.

L'irrigation au goutte à goutte

Le principe de la réflectométrie a pu être testé dans des conditions très différentes du premier essai.

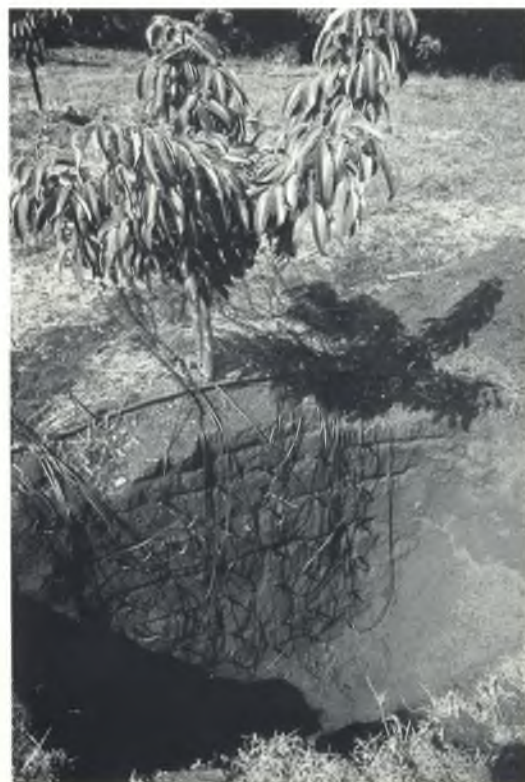
Ce second essai est mis en place sur une culture de tomates irriguée au goutte-à-goutte.

L'objectif est de tester l'homogénéité de l'arrosage le long d'une rampe de goutteurs, pour cela, les sondes sont installées verticalement.

Le réseau est constitué de goutteurs en ligne, d'un débit de 2,5 litres par heure, espacés de 40 centimètres. Deux séries d'aiguilles de 15 et 30 centimètres de long, espacées de 10 centimètres, sont installées verticalement de part et d'autre de la rampe.

La figure 5 représente le bilan d'infiltration sous la rampe de goutteurs, après une demi-heure d'irrigation. On visualise aisément la présence d'un « bulbe » d'humidité au droit de chaque goutteur, et la persistance d'une zone peu ou pas humidifiée entre chaque « bulbe ». Pour ce type de sol, les goutteurs sont donc trop espacés pour obtenir une humidité homogène à proximité de la surface. Pour des plantes à enracinement superficiel et à forte densité, les goutteurs doivent être disposés de manière plus serrée. Dans le cas de la tomate, cette observation s'applique pour la reprise du jeune plant, mais pas pour la plante adulte ; à chaque plant doit donc correspondre un goutteur.

Un drainage profond est également mis en évidence, preuve d'une irrigation excessive. Ceci confirme que dans ces sols à forte perméabilité (billon travaillé), il est nécessaire d'employer des débits faibles ($d = 2$ litres par heure).



Mise en place
du dispositif
de mesures
dans le verger
de litchis.
Cliché P. Todoroff

Conclusion

La grande maniabilité du réflectomètre et des sondes permet de mesurer des humidités dans des conditions qui seraient limitantes pour d'autres techniques. La réflectométrie temporelle est adaptée aussi bien à des relevés en profondeur qu'en surface. Les conditions d'obtention des mesures, avec des sondes enterrables, sont proches des conditions réelles puisque les perturbations de la culture et de la surface du sol sont limitées. Grâce aux possibilités de représentation des mesures en deux dimensions, la répartition de l'humidité est visualisée dans l'espace et son évolution est mémorisée.

Cette technique performante est utilisée pour des diagnostics d'irrigation, elle est aussi conseillée pour des suivis de routine pour surveiller le bon fonctionnement des arrosages. Prochainement, elle sera valorisée sur canne à sucre en conditions d'alimentation hydrique limitante. En revanche, la précision de cette technique n'est pas satisfaisante pour des mesures absolues d'humidité en l'absence d'étalonnage spécifique, il est alors préférable d'employer les méthodes gravimétriques et gammamétriques.

Bibliographie

- CORRE C., 1991. Caractérisation de la dynamique des transferts d'eau sous goutteurs. Diplôme d'agronomie approfondie, ENSA Toulouse, France, octobre 1991, 49 p.
- DAVIS J.L., ANNAN A.P., 1977. Electromagnetic Detection of Soil Moisture: Progress Report I. Canadian Journal of Remote Sensing, 3 (1): 76-86.
- HOEKSTRA P., DELANEY A., 1974. Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies. Journal of Geophysical Research, 79 (11): 1699-1708.
- KACHANOVSKI R.G., PRINGLE E., WARD A., 1992. Field Measurement of Solute Travel Times Using Time Domain Reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 56 (1): 47-52.
- ROTH C.H., MALCKI M.A., PLAGGE R., 1992. Empirical Evaluation of the Relationship Between Soil Dielectric Constant and Volumetric Water Content as the Basis for Calibrating Soil Moisture measurements by TDR. Journal of Soil Science, 43: 1-13.
- TODOROFF P., 1993. Adaptation méthodologique d'une sonde réflectométrique pour la mesure d'humidité des sols. Application aux sols de la Réunion. Nouvelles perspectives. Diplôme d'agronomie approfondie, mention génie agronomique, ENSA Montpellier ; CIRAD-CA, la Réunion, France, 57 p.
- TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P., 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research, 16 (3): 574-582.

Résumé... Abstract... Resumen

P. TODOROFF, P. LANGELLIER — La réflectométrie temporelle : une nouvelle approche des mesures d'humidité du sol.

La réflectométrie temporelle permet de mesurer l'humidité volumique du sol grâce à l'analyse de la propagation d'ondes électro-magnétiques en hyper-fréquences. Un étalonnage unique fournit une bonne précision pour la plupart des sols, et un étalonnage particulier a été établi pour les andosols, remarquables par leur comportement hydrique. Sur ces sols, étudiés à la Réunion, les méthodes classiques de mesure ne conviennent pas. Cette technique permet de réaliser facilement des mesures de surface et de profondeur, éventuellement en multiplexage. Les possibilités d'utilisation sont nombreuses et cette méthode est particulièrement pertinente pour les suivis de transferts hydriques. On obtient des représentations graphiques en deux dimensions de l'état hydrique du sol, ou un suivi dans le temps. Ainsi des bilans d'infiltration, réalisés sur un verger de litchis et une culture de tomates irriguée par goutte à goutte, ont permis d'ajuster les techniques d'irrigation.

Mots-clés : humidité volumique, réflectométrie temporelle, sol, irrigation, bilan hydrique, mesure.

P. TODOROFF, P. LANGELLIER — Time Domain Reflectometry: a new approach to the measurement of soil moisture.

Time Domain Reflectometry is used to measure the voluminal moisture content of the soil by analysis of hyperfrequency wave propagation. A single calibration operation provides satisfactory accuracy for most soils and special calibration has been designed for andosols, whose moisture behaviour is special. Conventional measurement methods are not suitable for these soils (studied in Reunion). It is easy to use the technique for measurements at the surface and at a depth, possibly using multiplexing. There is broad scope for use and the method is particularly appropriate for monitoring moisture movement. Two-dimensional graphs are obtained representing soil moisture and moisture can be monitored against time. Thus, infiltration records compiled for a litchi orchard and for trickle irrigated tomatoes were used to adjust watering techniques.

Keywords: voluminal moisture content, Time Domain Reflectometry, soil, irrigation, moisture balance, measurement.

P. TODOROFF, P. LANGELLIER — La reflectometria temporal, un nuevo enfoque de las mediciones de humedad del suelo.

La reflectometria temporal permite medir la humedad volúmica del suelo gracias al análisis de la propagación de ondas en hiperfrecuencias. Una calibración única proporciona una buena precisión en la mayoría de suelos y se ha establecido una calibración particular para los suelos silicatos, sobresalientes por su comportamiento hídrico. En estos suelos, estudiados en la Reunión, los métodos clásicos de medición no son adecuados: en cambio, esta técnica permite realizar fácilmente mediciones de superficie y de profundidad, incluso en multiplexado. Las posibilidades de multiplexión son numerosas y este método es particularmente pertinente para los seguimientos de las transferencias hídricas, obteniéndose representaciones gráficas en dos dimensiones del estado hídrico del suelo o un seguimiento en el tiempo. Así, los balances de infiltración realizados en un huerto de litchis y un cultivo de tomates irrigado en gota han permitido ajustar las técnicas de riego.

Palabras clave: humedad volúmica, reflectometria temporal, suelo, riego, balance hídrico, medición.